

# Proposition d'un sujet de stage de master M2 LabEX Primes WP4 LaHC - ESRF/CREATIS - CEA-LETI

**Intitulé du sujet :** Méthodes "problèmes inverses" pour la reconstruction de phase (*phase retrieval*) en holographie numérique en ligne (imagerie sans lentille, holotomographie X).

**Lieu :** Laboratoire Hubert Curien (LaHC), 18 Rue Pr B. Lauras, 42000 SAINT-ÉTIENNE.

**Encadrant principal :** Fabien Momey (contact : fabien.momey@univ-st-etienne.fr).

**Partenaires :** LaHC (Fabien Momey, Corinne Fournier, Loïc Denis), CREATIS (Françoise Peyrin, Max Langer), ESRF (Peter Cloetens), CEA-LETI (Cédric Allier, Jean-Marc Dinten).

**Démarrage prévu :** février/mars 2017.

**Rémunération :** ~ 500 euros/mois.

## Contexte et problématique :

L'holographie en ligne est une méthode d'imagerie non conventionnelle basée sur l'acquisition d'images défocalisées (hologrammes). Ces hologrammes correspondent à l'intensité de l'onde diffractée par un plan de transmittance complexe (amplitude et phase) composé d'objets absorbants et/ou déphasants (objets biologiques par exemple), soumis à une illumination cohérente ou partiellement cohérente (LED, laser, source X). Proposé par Gabor en 1948 [1], ce principe d'imagerie suit le principe de diffraction dans le régime de Fresnel. L'utilisation des capteurs numériques (CCD / CMOS) avec un champ de vue et une résolution pixellique suffisante (de l'ordre du micron) permettent l'acquisition d'hologrammes pouvant être refocalisés numériquement.

Les domaines d'application sont nombreux, allant de la mécanique des fluides ou la détection de nano-particules à, plus récemment, la microscopie pour la biologie - imagerie sans lentille [2, 3, 4] (*cf.* Fig. 1(a)). Cette technologie est entre autres développée au CEA-LETI, et fait l'objet d'une collaboration avec le LaHC sur le traitement des données. Une autre application d'intérêt est la tomographie de phase par rayonnement X synchrotron, développée notamment à l'ESRF de Grenoble en collaboration avec CREATIS [5, 6]. L'accès à l'information de phase se fait par l'acquisition, pour une projection, de différents plans défocalisés à plusieurs distances du plan détecteur (*cf.* Fig. 1(b)).

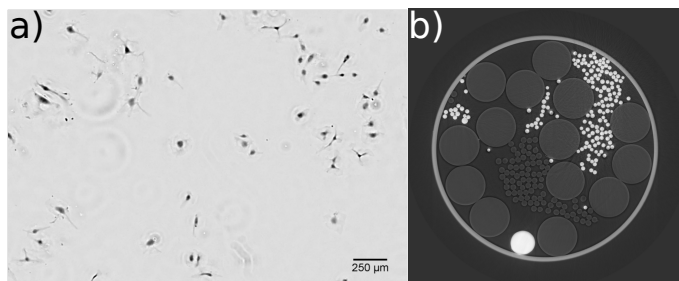


Figure 1: a) Reconstruction de cellules HUVEC par microscopie sans lentille (image CEA-LETI/DTBS/LISA). b) Reconstruction de phase en holotomographie X (image tirée de [6]).

Toutes ces applications mettent en œuvre un traitement numérique des données d'acquisition, qui consiste à "refocaliser" les hologrammes afin d'obtenir une image quantitative de la transmittance de l'objet : on parle de **reconstruction** (exemple simple de focalisation numérique). Cependant, comme seule l'intensité  $I$  de l'onde diffractée  $\underline{a}$  sur le détecteur est enregistrée, il manque l'information de phase de l'onde sur le plan détecteur, ce qui rend le problème de reconstruction fortement mal posé. Les méthodes employées doivent donc gérer ce manque d'information pour récupérer l'amplitude complexe du plan de transmittance, et notamment la phase, d'où la dénomination de **phase retrieval** pour ce type de problème.

## État de l'art

De nombreuses solutions, dépendant des applications, ont été proposées pour réaliser cette reconstruction :

- En imagerie sans lentille, les méthodes se basent sur l'inversion de la transformée de Fresnel (rétropropagation) [7]. En règle générale, les algorithmes de l'état de l'art alternent entre des étapes de rétropropagation des hologrammes au plan objet et de propagation sur le plan détecteur, avec des traitements intermédiaires pour la réduction des artefacts d'image jumelle [8, 9, 10]. Dans certaines applications, on multiplie les longueurs d'onde d'illumination (multi- $\lambda$ ) pour apporter plus d'information sur la phase à restaurer. Dans une logique d'instrumentation bas coût, on utilise aussi des capteurs couleur pour l'acquisition simultanée d'hologrammes multi- $\lambda$  [11].

- En holotomographie X, diverses approximations linéaires, avec des domaines de validités différents, sont utilisées [5] : équation de transport d'intensité (TIE) pour des objets proches du plan détecteur [12, 13], fonction de transfert de contraste (CTF) pour des objets faiblement absorbants et déphasants [14], approches mixtes TIE+CTF [15]. Ces méthodes offrent la possibilité de traiter rapidement et efficacement de gros volumes de données.

### Les limitations

Avec ces approches, des problématiques persistent :

- En holotomographie X, en raison des approximations sur les modèles (*e.g.* faible absorption, faible déphasage, hologrammes proches du détecteur), les images reconstruites demeurent floues et la non-uniformité du fond (terme basse fréquence) perturbe la quantification précise des paramètres physiques. De plus des problèmes d'étalonnage géométrique des acquisitions obligent à certains pré-traitements (recalage) qui peuvent être sources d'erreurs supplémentaires.
- En imagerie sans lentille, la question du domaine de validité des modèles utilisés se pose aussi, notamment concernant la densité maximale d'objets sur le plan de transmittance pour que les hypothèses restent acceptables. Un autre point important concerne le traitement conjoint des données multi-multi- $\lambda$ .
- Quelle que soit l'application, le souci d'obtenir une reconstruction de qualité dans un temps acceptable reste l'un des points-clés d'une "bonne" méthode de traitement.

### Approche proposée

Pour lever ces verrous, les approches de type "problèmes inverses" peuvent offrir de bons résultats. Des travaux au LaHC ont déjà montré le potentiel de ce type de méthodes appliquées à l'holographie numérique [16, 17, 18]. Parmi les avantages, on peut citer :

- l'utilisation d'un modèle direct potentiellement non linéaire (sans requérir que ce dernier soit inversible) pour notamment étendre les domaines d'acceptation des objets à reconstruire.
- une prise en compte statistique du bruit de mesure (gaussien, poisson, pixels morts).
- l'injection d'information a priori pertinente sous forme d'un terme de régularisation favorisant des solutions lisses et/ou parcimonieuses (L2, L2/L1, L1, TV), permettant d'améliorer encore la résolution atteignable.
- l'auto-étalonnage possible de certaines paramètres d'acquisition : recalage, super-résolution [19, 20].
- la prise en compte efficace de données hétérogènes (*e.g.* multi- $\lambda$ ).

### Sujet du stage :

L'application de l'approche inverse au problème de restauration de phase, en microscopie sans lentille et en holotomographie X, peut être abordée sous un formalisme et un cadre algorithmique commun. Le stage proposé s'appuiera sur les compétences complémentaires de 3 laboratoires, à savoir :

**LaHC** Reconstruction d'images en holographie numérique : problèmes inverses, méthodes d'optimisation, auto-étalonnage.

**ESRF/CREATIS** Expertise en imagerie par rayonnement X synchrotron : tomographie, holotomographie, méthodes de reconstruction.

**CEA-LETI** Développement de systèmes de microscopie sans lentille : holographie couleur, tomographie diffractive, méthodes de reconstruction et d'analyse.

Basé au laboratoire Hubert Curien qui dispose de développements avancés sur cette thématique, le candidat au stage aura la charge de mettre en œuvre et de tester des algorithmes de type "problèmes inverses régularisés" pour la reconstruction de phase 2D et collaborera avec les personnes du laboratoire impliquées dans le projet. Les applications visées sont le traitement de données pour la microscopie sans lentille ainsi que pour la tomographie de phase par rayonnement X synchrotron. Des journées de travail et/ou de discussions à l'ESRF (et peut-être au CEA-LETI) avec les partenaires de l'étude sont à prévoir.

## References

- [1] D. Gabor, "A new microscopic principle," *Nature*, vol. 161, pp. 777–778, 1948.
- [2] L. Repetto, E. Piano, and C. Pontiggia, "Lensless digital holographic microscope with light-emitting diode illumination," *Optics Letters*, vol. 29(10), pp. 1132–1134, 2004.
- [3] S. O. Isikman, W. Bisharaa, S. Mavandadia, F. W. Yua, S. Fenga, R. Laua, and A. Ozcan, "Lens-free optical tomographic microscope with a large imaging volume on a chip", *PNAS*, vol. 108(18), pp. 7296–7301, 2011.

- [4] A. Greenbaum, W. Luo, T-W. Su, Z. Göröcs, L. Xue, S.O. Isikman, A.F. Coskun, O. Mudanyali, and A. Ozcan, "Imaging without lenses: achievements and remaining challenges of wide-field on-chip microscopy", *Nature Methods*, vol. 9, pp. 889–895, 2012.
- [5] M. Langer, P. Cloetens, J. P. Guigay, and F. Peyrin, "Quantitative comparison of direct phase retrieval algorithms in in-line phase tomography", *Med. Phys.*, vol. 35, pp. 4556–4566, 2008.
- [6] M. Langer, P. Cloetens, and F. Peyrin, "Regularization of Phase Retrieval With Phase-Attenuation Duality Prior for 3-D Holotomography", *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 9(9), pp. 2428–2436, 2010.
- [7] J. P. Guigay, "Fourier transform analysis of Fresnel diffraction patterns and in-line holograms," *Optik*, vol. 46, pp. 121–125, 1977.
- [8] R. W. Gerchberg and W. O. Saxton, "A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures," *Optik*, vol. 35, pp. 237–246, 1972.
- [9] J. R. Fienup, "Phase retrieval algorithms: A comparison," *Appl. Opt.*, vol. 21, pp. 2758–2769, 1982.
- [10] L Denis, C. Fournier, T. Fournel and C. Ducottet, "Numerical suppression of the twin image in in-line holography of a volume of micro-objects", *IOP Measurement Science and Technology*, vol. 19(7), pp. 074004, 2008.
- [11] Y. Zhang, Y. Wu, Y. Zhang, and A. Ozcan, "Color calibration and fusion of lens-free and mobile-phone microscopy images for high-resolution and accurate color reproduction", *Nature Scientific Reports*, 2016.
- [12] K. Nugent, T. Gureyev, D. Cookson, D. Paganin, and Z. Barnea, "Quantitative phase imaging using hard X rays," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 77, pp. 2961–2964, 1996.
- [13] D. Paganin and K. A. Nugent, "Noninterferometric phase imaging with partially coherent light," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 80, pp. 2586–2589, 1998.
- [14] P. Cloetens, W. Ludwig, J. Baruchel, D. Van Dyck, J. Van Landuyt, J. P. Guigay, and M. Schlenker, "Holotomography: Quantitative phase tomography with micrometer resolution using hard synchrotron radiation X rays," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 75, pp. 2912–2914, 1999.
- [15] J. P. Guigay, M. Langer, R. Boistel, and P. Cloetens, "Mixed contrast transfer and transport of intensity approach for phase retrieval in the Fresnel region," *Opt. Lett.*, vol. 32, pp. 1617–1619, 2007.
- [16] F. Soulez, L. Denis, C. Fournier, E. Thiébaud, and C. Goepfert, "Inverse problem approach for particle digital holography: accurate location based on local optimisation," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 24, pp. 1164–1171, 2007.
- [17] L. Denis, D. Lorenz, E. Thiébaud, C. Fournier, et D. Trede, "Inline hologram reconstruction with sparsity constraints", *Optics Letters*, vol. 34, no 22, p. 3475–3477, 2009.
- [18] M. Seifi, C. Fournier, N. Grosjean, L. Méès, J.-L. Marié, and L. Denis, "Accurate 3D tracking and size measurement of evaporating droplets using an in-line digital holography and "inverse problems" reconstruction approach", *Optics Express*, 2013.
- [19] W. Bishara, T.-W. Su, A. F. Coskun, and A. Ozcan, "Lensfree on-chip microscopy over a wide field-of-view using pixel super-resolution", *Optics express*, vol. 18(11), pp. 11181–11191, 2010.
- [20] N. Verrier, and C. Fournier, "Digital holography super-resolution for accurate three-dimensional reconstruction of particle holograms", *Optics letters*, vol. 40(2), pp. 217–220, 2015.